

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroenergetiky

**Návrh generátoru spínacího impulzu s transformátorem**  
**Project of Switch Impulse Generator with Transformer**

# Zadání bakalářské práce

Student: **Jaromír Svoboda**

Studijní program: B2645 Elektrotechnika, sdělovací a výpočetní technika

Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika

Téma: **Návrh generátoru spínacího impulsu s transformátorem**  
**Project of Switch Impulse Generator with Transformer**

Zásady pro vypracování:

1. Porovnejte možná zapojení generátorů spínacích impulsů
2. Vytvořte metodiku pro návrh generátoru normalizovaného impulsu
3. Na vybraném příkladu ověřte metodiku návrhu

Seznam doporučené odborné literatury:

VEVERKA, Antonín: Technika vysokých napětí. Praha: SNTL, 1982. 304 s.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Dr. Ing. Věslav Mach**

Datum zadání: 30.11.2008

Datum odevzdání: 07.05.2009

---

prof. Ing. Zdeněk Hradílek, DrSc.  
*vedoucí katedry*

---

prof. Ing. Ivo Vondrák, CSc.  
*děkan fakulty*

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně.

Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou/diplomovou práci užít (§35 ods. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě.....

Podpis studenta

### **Abstrakt**

Úkolem této bakalářské práce je porovnat možná zapojení generátorů spínacích impulzů, vytvořit metodiku pro jejich návrh a tuto metodiku ověřit.

Je zde nastíněna problematika generátorů spínacích impulzů (všeobecné poznatky, základní zapojení atd.), dále je vytvořen návrh generátoru normalizovaného spínacího impulsu dle Angeliniho a následně porovnán s běžně používanými generátory v současnosti. Hlavním úkolem je pak navrhnout dosud málo používaný generátor spínacího impulsu s transformátorem. Základem návrhu je zjednodušený obvod transformátoru, který v zapojení generátoru vyrábí spínací impuls napětí.

Pro ověření metodiky návrhu byl použit program EMTP-ATP.

### **Klíčová slova**

generátor normalizovaného spínacího impulsu (s transformátorem), spínací přepětí, EMTP-ATP

### **Abstract**

Main purpose of this baccalaureate work is compared possibly participation of switch impulse generators, created procedure for their proposal and attested this procedure.

There is foreshadowed dilemma of switch impulse generators (general cognisances, basic wiring etc.), further is created proposal of normalized switch impulse generator according to Angelini and sequentially is collated with generators familiarly used in present. Then main imposition is suggest unusual switch impulse generator with transformer yet. Basis of proposal is simplified circuit of transformer, that in wiring of generator produces voltage switching impulse.

To check procedure of proposal was used program EMTP-ATP.

### **Key words**

generator of normalized switching impulse (with transformer), switching overvoltage, EMTP-ATP

## Seznam symbolů

$B$	(T)	magnetická indukce transformátoru
$C_1$	(F)	čelní kapacita generátoru
$C_2$	(F)	zatěžovací kapacita generátoru
$E$	(J)	energie generátoru
$I_1$	(A)	primární proud transformátoru
$L$	(H)	indukčnost jednoho stupně $n$ stupňového generátoru
$L_{1\sigma}$	(H)	indukčnost primárního vinutí transformátoru
$L_{2\sigma}$	(H)	indukčnost sekundárního vinutí transformátoru
$L_p$	(H)	indukčnost přívodů ke zkoušenému předmětu
$L_\mu$	(H)	indukčnost magnetického obvodu transformátoru
$S$	(V·A)	výkon transformátoru
$R_1$	( $\Omega$ )	čelní odpor generátoru (odpor primárního vinutí transformátoru)
$R_{1T}$	( $\Omega$ )	odpor primárního vinutí transformátoru (BCTRAN)
$R_2$	( $\Omega$ )	týlní odpor generátoru (odpor sekundárního vinutí transformátoru)
$R_{2T}$	( $\Omega$ )	odpor sekundárního vinutí transformátoru (BCTRAN)
$R_{Ext}$	( $\Omega$ )	externí odpor generátoru (BCTRAN)
$R_{Fe}$	( $\Omega$ )	odpor magnetického obvodu transformátoru
$R_a$	( $\Omega$ )	tlumicí odpor
$S$	(-)	spínací jiskřiště
$T_\zeta$	(s)	doba čela napětového impulsu
$T_p$	(s)	doba půltýlu napětového impulsu
$Tr$	(-)	transformátor
$U_1$	(V)	napětí na primární straně transformátoru
$U_2$	(V)	napětí na sekundární straně transformátoru
$U_C$	(V)	nabíjecí napětí generátoru
$U_m$	(V)	maximální hodnota napětí impulsu
$X$	(-)	pomocný činitel
$X_\mu$	( $\Omega$ )	reaktance magnetického obvodu transformátoru
$Z$	( $\Omega$ )	impedance transformátoru
$f$	(Hz)	frekvence sítě
$i_0$	(%)	proud naprázdno transformátoru
$u$	(V)	výstupní napětí generátoru
$u_k$	(%)	napětí nakrátko transformátoru
$\Delta P_0$	(W)	ztráty naprázdno transformátoru
$\Delta P_k$	(W)	ztráty nakrátko transformátoru
$\Theta$	(-)	konstanta generátoru
$\alpha$	(-)	konstanta generátoru
$\eta$	(-)	konstanta generátoru

## Obsah

Úvod.....	1
1 Generátory spínacích impulzů napětí .....	2
1.1 Normalizovaný spínací impuls napětí - parametry .....	2
1.2 Základní zapojení .....	3
1.3 Marxovo zapojení .....	4
Vliv indukčnosti na funkci několikastupňového generátoru .....	6
1.4 Generátor spínacího impulsu napětí s transformátorem .....	6
1.5 Požadavky na generátory spínacích impulzů napětí .....	7
2 Návrh generátoru spínacího impulsu napětí .....	8
2.1 Určení konstant generátoru pro danou vlnu .....	9
2.2 Návrh generátoru spínacího impulsu napětí s transformátorem .....	10
3 Ověření metodiky návrhu .....	15
3.1 Řešení návrhu generátoru SGSA 600-30 .....	15
3.2 Řešení návrhu generátoru s transformátorem .....	18
Závěr .....	26
Seznam obrázků .....	27
Literatura .....	28

## Úvod

Bakalářská práce se zabývá problematikou generátorů spínacích impulzů napětí. Tyto generátory slouží k simulaci spínacích přepětí (krátkých impulzů napětí), která vznikají při manipulaci v elektrických obvodech jako jsou např. vypínání zkratů, vypínání malých indukčních a kapacitních proudů, zapínání nezatížených vedení atd. Jsou to přepětí mezi fázemi a zemí nebo mezi fázemi v daném místě. Generátory dále slouží ke zkouškám izolace na elektrickou pevnost (transformátorů, přístrojů, vedení) spínacím impulzem, pro určení charakteristik spínacích impulzů, ke zjišťování ochranného působení zemnicích lan a pro studium výbojů při velmi vysokém napětí. Všeobecné poznatky a možnosti zapojení těchto generátorů jsou shrnuty v první kapitole.

Generátory spínacích impulzů jsou vyráběny především jako derivační *RC* článek. Jsou založeny na principu vybíjení nabitého kondenzátoru do obvodu složeného z odporů a kondenzátoru, zde od firmy Haefely, která se zabývá testováním vysokým napětím. Dalším méně obvyklým způsobem výroby spínacího impulzu je vybíjet nabitý kondenzátor do vinutí transformátoru, jehož návrhem se podrobně zabývá kapitola 2.2.

Pro ověření návrhů zde byl použit PC software EMTP-ATP sloužící k simulaci přechodných jevů v elektrických obvodech.



# 1 Generátory spínacích impulzů napětí

Generátory spínacích impulzů napětí se nejčastěji používají pro zkoušení izolace transformátorů, přístrojů, vedení (koordinace izolace), pro určení charakteristik spínacích impulzů, ke zjišťování ochranného působení zemnicích lan, k simulaci spínacího přepětí při manipulacích v elektrických obvodech a pro studium výbojů při velmi vysokém napětí jak již bylo řečeno v úvodu. [1]

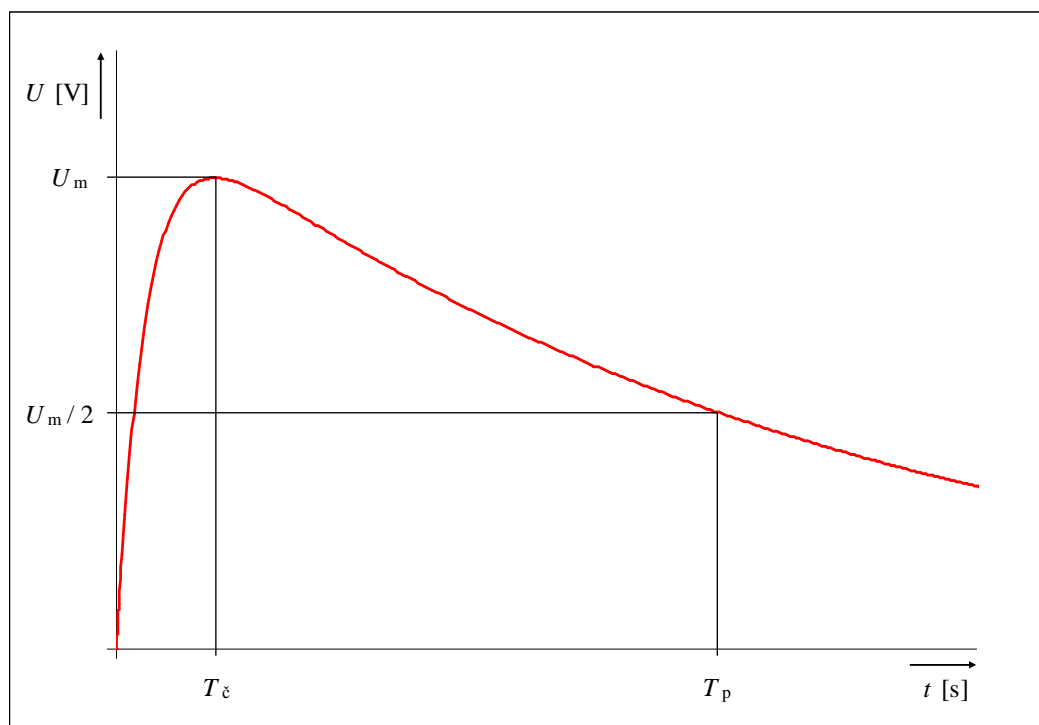
Koordinace izolace zahrnuje volbu elektrické pevnosti zařízení a způsob její aplikace v provozu v závislosti na napětích, která se mohou objevit v soustavě. Rozlišují se tři kategorie nejvyšších napětí A (1 až 52 kV), B (52 až 300 kV) a C (nad 300 kV). Spínacím impulzem se zkouší izolační hladina v kategorii C. [2]

## 1.1 Normalizovaný spínací impuls napětí - parametry

Pro simulaci spínacího přepětí se používá normalizovaný spínací impuls napětí. Je to jednosměrná vlna, která plynule vzrůstá na maximální hodnotu a pak zaniká. Je charakterizována polaritou, maximální hodnotou ( $U_m$ ), tvarem a dobou trvání. [1]

Vlna napětí, která není přerušena průrazem nebo přeskokem, se nazývá *plná vlna napětí*. Vlna napětí, která je přerušena průrazem nebo přeskokem (prudký pokles napětí), se nazývá *kusá vlna napětí*. [1]

Normalizovaný spínací impuls má dobu čela  $T_c = 250 \mu s$  s tolerancí  $\pm 20 \%$ , dobu půltýlu  $T_p = 2500 \mu s$  s tolerancí  $60 \%$ . Tolerance maximální hodnoty  $U_m$  je  $\pm 3 \%$ . [2] Doba čela impulsu je čas, za který se napětí dostane z nuly na maximální hodnotu  $U_m$  a doba půltýlu je čas, kdy napětí klesne na hodnotu  $U_m/2$ . Na Obr. 1.1 je naznačeno vyhodnocení normalizovaného spínacího impulsu napětí.

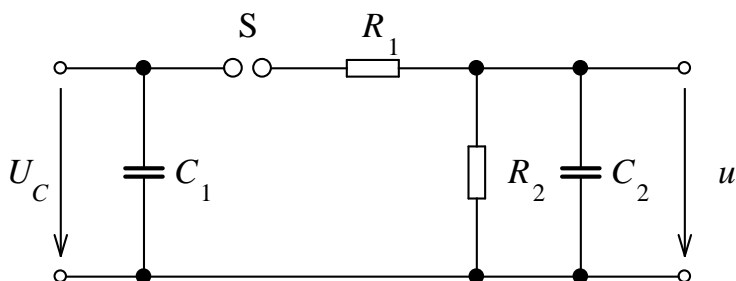


**Obr. 1.1** Vyhodnocení normalizovaného spínacího impulsu napětí

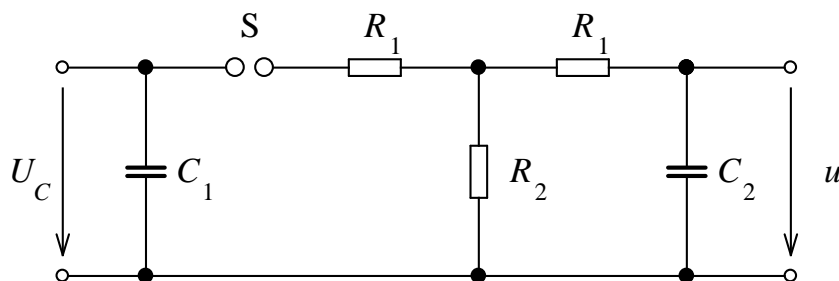
## 1.2 Základní zapojení

Obvyklé zapojení generátoru spínacího impulsu napětí je na Obr. 1.2. Skládá se z tzv. činné kapacity  $C_1$ , zatěžovací kapacity  $C_2$ , čelního odporu  $R_1$ , týlního odporu  $R_2$  a spínacího jiskřiště  $S$ . Nabítený kondenzátor  $C_1$  ze stejnosměrného zdroje se přes toto jiskřiště vybije do kondenzátoru  $C_2$  přes čelní odpor  $R_1$ . Vybíjení kondenzátoru  $C_2$  je dáno týlním odporem  $R_2$ . [1]

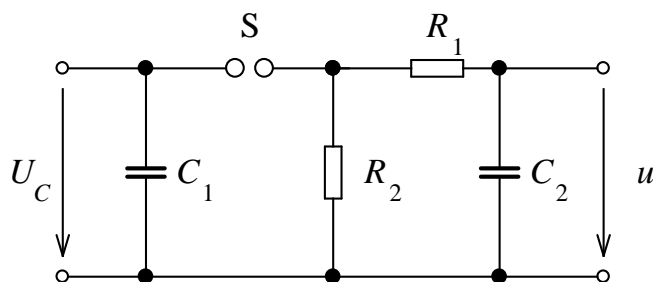
Další možnosti zapojení jsou na Obr. 1.3 a Obr. 1.4. Jedná se o jednostupňový generátor, který je odvozen z Marxova vícestupňového zapojení. Od schéma na Obr. 1.2 se liší zapojením čelního odporu  $R_1$ , což umožňuje vyrobit napěťový impuls o větší amplitudě. [1]



**Obr. 1.2** Schéma zapojení generátoru spínacího impulsu napětí



Obr. 1.3 Schéma jednostupňového generátoru spínacího impulsu napětí



Obr. 1.4 Schéma jednostupňového generátoru spínacího impulsu napětí

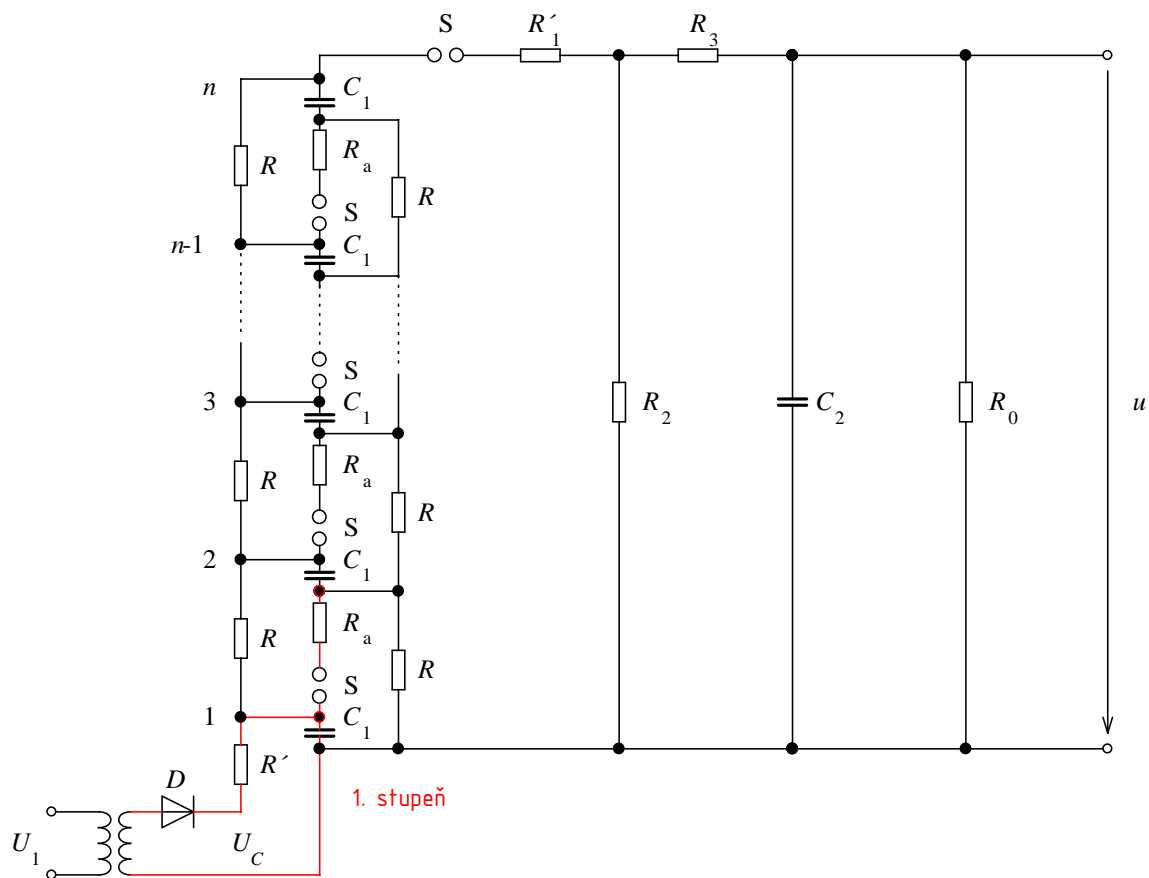
### 1.3 Marxovo zapojení

Generátor z Obr. 1.2 je omezen velikostí napětí zdroje, proto se používá několikastupňové uspořádání (Marxovo zapojení), jehož schéma je na Obr. 1.5 s vyznačením prvního stupně. Tento generátor je složen z kondenzátorů  $C_1$ , které se nabíjí paralelně přes rezistory  $R$  ( $R'$ ) a zapojí se přes jiskřiště  $S$  do série. Jejich napětí se tedy sečtou a následně se vybíjí přes tlumicí odpory  $R_a$  do obvodu složeného z rezistorů  $R'_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  a kondenzátoru  $C_2$ . [1]

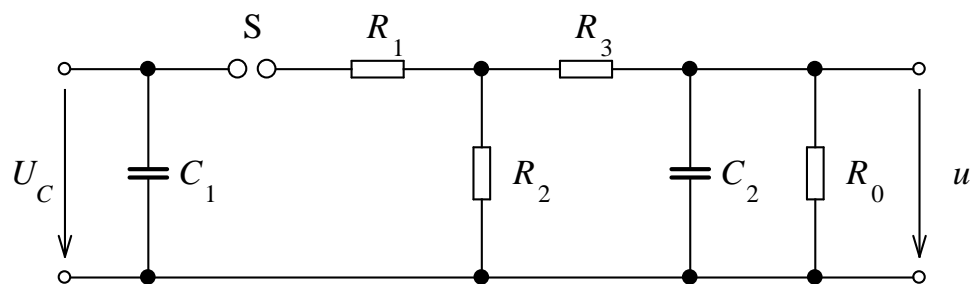
Kondenzátory  $C_1$  tvoří činnou kapacitu  $C'_1 = \frac{C_1}{n}$ , odpory  $R'_1$  a  $R_a$  tvoří čelní odpor

$R_1 = R'_1 + (n-1) \cdot R_a$ , kde  $n$  je počet stupňů generátoru. Výstupní napětí je potom  $u = \eta \cdot n \cdot U_C$ .  $R_0$  je odporový dělič.

Za předpokladu, že indukčnost větví je zanedbatelná, kapacita  $C_1$  generátoru je minimálně pětikrát větší než kapacita  $C_2$  a zkoušený předmět představuje kapacitu nebo odpor (nebo paralelní kombinace), kterým protéká daleko menší proud než kapacitou  $C_2$ , lze zjednodušit schéma z Obr. 1.5 na schéma viz. Obr. 1.6. V laboratorní praxi se však vyskytují jiná zapojení, která jsou na Obr. 1.3 a Obr. 1.4. [1]



Obr. 1.5 Schéma zapojení generátoru spínacího impulzu napětí v Marxově zapojení



Obr. 1.6 Zjednodušené schéma Marxova zapojení

### Vliv indukčnosti na funkci několikastupňového generátoru [1]

Pro utlumení oscilací (generátoru jako celku), které jsou způsobené celkovou indukčností generátoru spínacího impulsu napětí  $L_c$  a indukčností přívodů zkoušeného předmětu, je nutno splnit aperiodickou podmínku

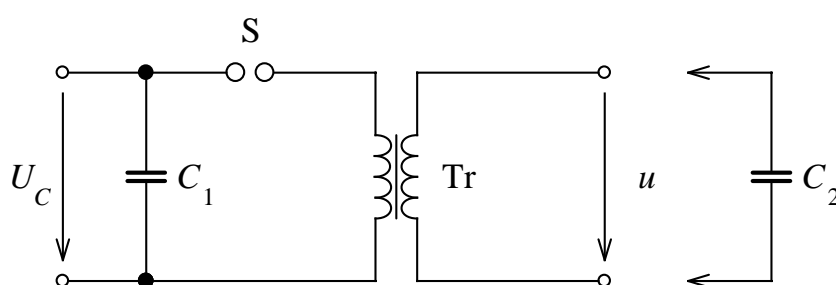
$$R_1 + R_3 \geq 2 \cdot \sqrt{\frac{L_c}{\frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}}} \quad (1.1)$$

U  $n$  stupňového generátoru (viz. Obr. 1.5) bývá  $R_1 + R_3 \cong n \cdot R_a$  a  $L_c = n \cdot L + L_p$ , kde  $L$  je indukčnost jednoho stupně generátoru a  $L_p$  je indukčnost přívodů ke zkoušenému předmětu. Uvažuje-li se  $C_2 > C_1$ , lze rovnici (1.1) psát jako

$$R_a \geq \sim 2 \cdot \sqrt{\frac{L}{n \cdot C_2}} \quad (1.2)$$

## 1.4 Generátor spínacího impulsu napětí s transformátorem

Generátor je opět složen z činné kapacity  $C_1$ , zatěžovací kapacity  $C_2$  (zkoušený předmět), transformátoru Tr a spínacího jiskřiště S. Schéma zapojení je na Obr. 1.7. Kondenzátor  $C_1$  je nabit ze stejnosměrného zdroje napětí a přes spínací jiskřiště se vybíjí do vinutí transformátoru. Na výstupu se objeví napěťový impuls jehož tvar je ovlivněn odporem a indukčností primárního a magnetického obvodu transformátoru.



Obr. 1.7 Schéma zapojení generátoru spínacího impulsu napětí s transformátorem

### **1.5 Požadavky na generátory spínacích impulzů napětí**

Generátory spínacích impulzů napětí by pokud možno měly zabírat co nejmenší místo, uspořádání by mělo být přehledné s co nejmenší indukčností. [1]

Energie generátoru  $E = C_1 \cdot U_c^2 / 2$  se mění s připojením zkoušeného předmětu. Kapacity zkoušených předmětů jsou různé. Nejmenší kapacitu mají průchodky a izolátory ( $100 \div 300 \text{ pF}$ ). U transformátoru se nejprve uplatňuje kapacita, pak se uplatní indukčnost. Největší kapacitu mají kabely (až  $0,1 \mu\text{F}$ ). [1]

Pro vyšší napětí se používají složitější zapojení generátorů spínacích impulzů napětí. Pro výrobu zvlášť vysokých spínacích napětí se používají transformátory řazené v kaskádě. [1]

## 2 Návrh generátoru spínacího impulsu napětí

Počítají se tyto hodnoty:

- tvary napěťové vlny
- konstanty (odpory a kapacity)

Pro návrh generátoru slouží obecná Angeliniho rovnice. [2]

$$u = \frac{U_C}{\eta \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{\alpha^2}}} \cdot \left[ e^{\frac{-(\alpha - \sqrt{\alpha^2 - 1})t}{\Theta}} - e^{\frac{-(\alpha + \sqrt{\alpha^2 - 1})t}{\Theta}} \right] \quad (2.1)$$

kde  $\eta$ ,  $\alpha$ ,  $\Theta$  jsou konstanty,  $U_C$  je napětí na činné kapacitě  $C_1$  (vrcholová hodnota napětí na zkoušeném předmětu je  $U_m$ ). Velikosti konstant  $\alpha$ ,  $\eta$ ,  $\Theta$  pro různá schémata Angelini vypočítal. V Tab. 2.1 jsou uvedeny tyto konstanty pro spojení podle Obr. 1.2 a Obr. 1.4. [1]

**Tab. 2.1 Parametry generátorů spínacích impulsů napětí**

Charakteristické hodnoty spínacího impulsu napětí jako funkce konstant generátoru			
Obr.	$\Theta =$	$\eta =$	$\alpha =$
1.2	$\sqrt{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2}$	$1 + \frac{C_2}{C_1} + \frac{R_1}{R_2}$	$\frac{\eta}{2} \cdot \sqrt{\frac{R_2 \cdot C_1}{R_1 \cdot C_2}}$
1.4	$\sqrt{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2}$	$1 + \frac{C_2}{C_1} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)$	$\frac{\eta}{2} \cdot \sqrt{\frac{R_2 \cdot C_1}{R_1 \cdot C_2}}$
Konstanty generátoru jako funkce charakteristických hodnot spínacího impulsu napětí			
Obr.	$X =$	$R_1 =$	$R_2 =$
1.2	$\frac{1}{\alpha^2} \cdot \left(1 + \frac{C_1}{C_2}\right)$	$\frac{\alpha \cdot \Theta}{C_1} \cdot (1 - \sqrt{1 - X})$	$\frac{\alpha \cdot \Theta}{C_1 + C_2} \cdot (1 + \sqrt{1 - X})$
1.4	$\frac{1}{\alpha^2} \cdot \left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right)$	$\frac{\alpha \cdot \Theta}{C_2} \cdot (1 - \sqrt{1 - X})$	$\frac{\alpha \cdot \Theta}{C_1 + C_2} \cdot (1 + \sqrt{1 - X})$

## 2.1 Určení konstant generátoru pro danou vlnu

Zpravidla jsou známy kapacity  $C_1$ ,  $C_2$  a doby čela a půltýlu. Počítají se odpory  $R_1$  a  $R_2$ , kterými se dosahuje potřebný tvar impulzu. [1]

Příklad určení konstant a prvků generátoru je proveden dle generátoru SGSA 600-30 od firmy Haefely v  $RC$  zapojení podle schématu na Obr. 1.4. Z katalogu této firmy [4] se pro příslušný typ generátoru vyčtou potřebné kapacity, doby čela a půltýlu jsou pro spínací impuls normalizované viz. 1.1.

Dále je nutné určit konstantu generátoru  $\alpha$ . Tato konstanta bývá u spínacích impulsů okolo 3,5. Přesná hodnota konstanty se dá určit experimentem, který spočívá ve sledování poměru doby čela k době půltýlu při změnách této konstanty  $\alpha$ . Poměr těchto časů by měl být přesně 2 jak je vidět z. Obr. 1.1. Konstanta bude tím přesnější, čím bude zadáván menší krok změny (poměr doby čela a půltýlu se bude více blížit 2).

Z Angeliniho rovnice lze odvodit vztah pro čas maxima (doby čela) a odtud určit konstantu  $\Theta$ : [3]

$$\Theta = T_{\epsilon} \cdot \frac{2 \cdot \sqrt{\alpha^2 - 1}}{\ln \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 - 1}}{\alpha - \sqrt{\alpha^2 - 1}}} \quad (2.2)$$

Podle vzorce v Tab. 2.1 se určí pomocný činitel  $X$ .

$$X = \frac{1}{\alpha^2} \cdot \left( 1 + \frac{C_2}{C_1} \right) \quad (2.3)$$

Jestliže jsou známy tyto dvě konstanty a pomocný činitel, není už problém spočítat odpory  $R_1$  a  $R_2$  pomocí vzorců v Tab. 2.1.

$$R_1 = \frac{\alpha \cdot \Theta}{C_2} \cdot (1 - \sqrt{1 - X}) \quad (2.4)$$

$$R_2 = \frac{\alpha \cdot \Theta}{C_1 + C_2} \cdot (1 + \sqrt{1 - X}) \quad (2.5)$$



Takto by se tedy navrhly základní prvky generátoru spínacího impulsu v  $RC$  zapojení. Kapacita zkoušeného předmětu  $C_{Zk}$  není vypočtena analyticky, ale pro jednoduchost je pouze pokusem navržena v programu EMTP-ATP tak, aby parametry impulsu nepřekročily normované tolerance viz. 1.1. Pro další specifické parametry jako jsou amplituda impulsu a využití generátoru je nutno dopočítat poslední konstantu generátoru  $\eta$  podle vzorce v Tab. 2.1.

$$\eta = 1 + \frac{C_2}{C_1} \cdot \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \quad (2.6)$$

Amplituda impulsu lze spočítat z obecné Angeliniho rovnice dosazením normalizované doby čela spínacího impulsu za čas  $t$ .

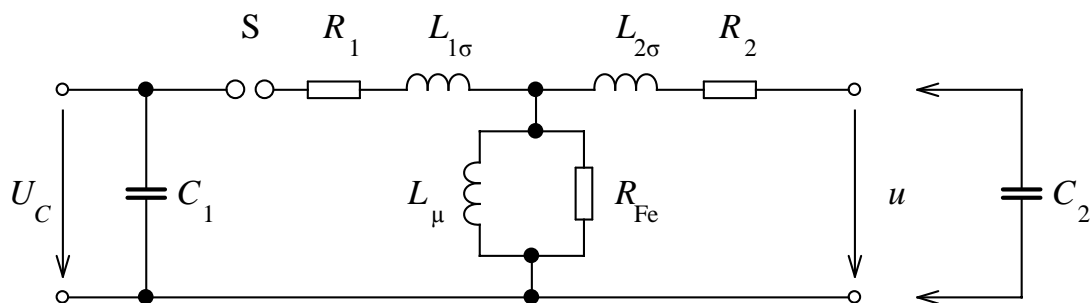
$$U_m = \frac{U_c}{\eta \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{\alpha^2}}} \cdot \left[ e^{-\left(\alpha - \sqrt{\alpha^2 - 1}\right) \frac{T_k}{\theta}} - e^{-\left(\alpha + \sqrt{\alpha^2 - 1}\right) \frac{T_k}{\theta}} \right] \quad (2.7)$$

Využitím generátoru se rozumí podíl amplitudy impulsu a nabíjecího napětí.

$$\text{využití generátoru} = \frac{U_m}{U_c} \quad (2.8)$$

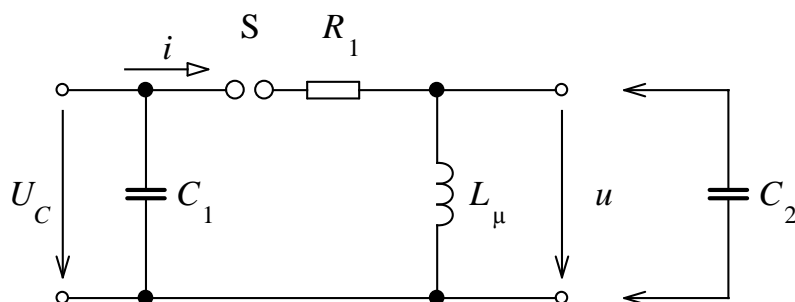
## 2.2 Návrh generátoru spínacího impulsu napětí s transformátorem

Na Obr. 2.1 je náhradní schéma transformátoru v zapojení generátoru spínacího impulsu napětí. Nabíjecí napětí a obě kapacity se ponechají stejné jako v případě generátoru SGSA 600-30. Jelikož obvod z Obr. 2.1 je velice složitý a návrh ostatních prvků obvodu by byl pracný, je zapotřebí schéma patřičně upravit a zjednodušit.



Obr. 2.1 Náhradní schéma generátoru s transformátorem

Po bližším prozkoumání náhradního schématu transformátoru (experimenty v preprocesoru programu EMTP-ATP ATPDraw) je podélná sekundární větev, tedy odpor a indukčnost sekundárního vinutí, zbytečná. Změny hodnot prvků sekundárního vinutí nemají žádný vliv na tvar impulzu napětí a mohou se tudíž zanedbat. Tím se schéma sice zjednodušilo, ale obvod je stále dost složitý. Proto nezbývá nic jiného, než dále pokračovat v experimentu zkoumání citlivosti obvodu na změny zbylých prvků. V podélné větvi primárního vinutí je dominantní pro tvar impulzu odpor  $R_1$ , v příčné větvi naopak indukčnost  $L_\mu$ . Z obvodu se tedy odpojí odpor příčné větve  $R_{Fe}$  a indukčnost podélné primární větve  $L_{1\sigma}$ . Schéma z Obr. 2.1 přejde na schéma viz. Obr. 2.2. Je to vlastně  $RLC$  obvod kde průběh proudu určuje rovnice (2.9) [3].



**Obr. 2.2  $RLC(-C)$  obvod**

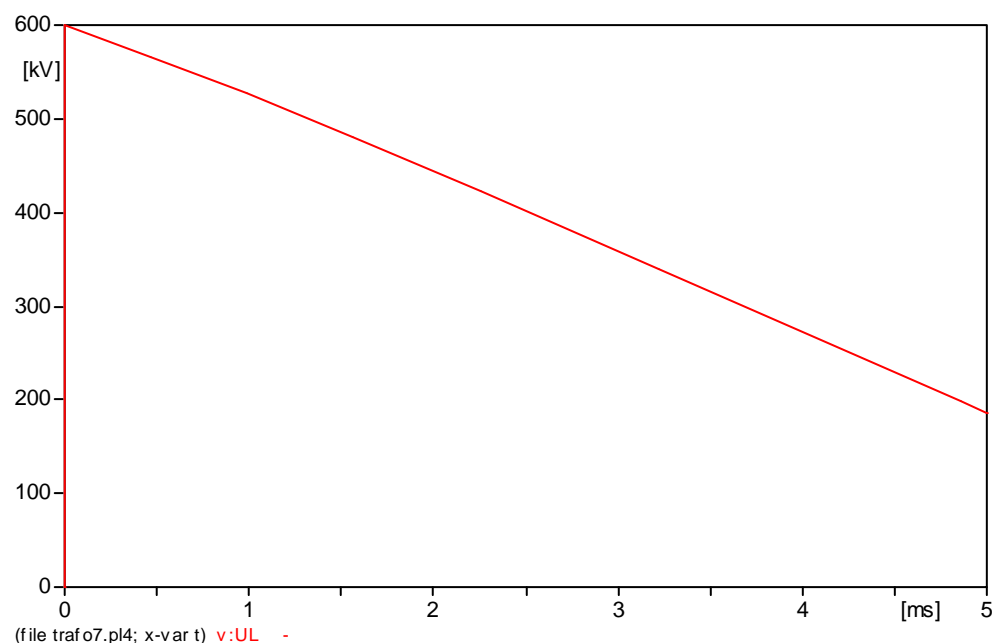
$$i = \frac{2U}{R \cdot \sqrt{d^2 - 1}} \cdot \exp\left(-\frac{R}{2L}t\right) \cdot \sin\left(\frac{R}{2L}\sqrt{d^2 - 1} \cdot t\right) \quad (2.9)$$

kde

$$d = 2 \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{R} \quad (2.10)$$

Napětí na indukčnosti  $L_\mu$  je potom dáno derivací proudu podle času (2.11). Na Obr. 2.3 je předpokládaný průběh tohoto napětí.

$$u = L_\mu \cdot \frac{di}{dt} \quad (2.11)$$



**Obr. 2.3** Průběh napětí na indukčnosti v *RLC* obvodu

Po připojení zatěžovací kapacity  $C_2$  (1,7 nF) se obvod značně zkomplikuje. Je zapotřebí vyřešit diferenciální rovnici 3. řádu:

$$R_1 \frac{d^3 i_2}{dt^3} + \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) \frac{d^2 i_2}{dt^2} + \frac{R_1}{C_2 \cdot L_\mu} \frac{di_2}{dt} + \frac{i_2}{C_1 \cdot C_2 \cdot L_\mu} = 0 \quad (2.12)$$

Daleko jednodušší způsob návrhu je zkoušet volit parametry  $R_1$ ,  $L_\mu$  (v ATPDraw) a sledovat podobnost normalizovaného spínacího impulsu s průběhem napětí na  $L_\mu$ . Odpozem  $R_1$  se nastavuje doba čela a příčnou indukčností  $L_\mu$  doba půltýlu. Jelikož indukčnost primárního vinutí  $L_{1\sigma}$  má také jakýsi malý vliv na průběh výstupního napětí, nenastavuje se přesně normalizovaná doba čela viz. 1.1, ale nechá se určitá rezerva pro uplatnění této indukčnosti (doba čela se nepatrně zkrátí). Dále je vhodné prodloužit dobu půltýlu na maximum (tzn. 60 %  $T_p$ ), aby se co nejvíce zvýšila hodnota indukčnosti  $L_\mu$ . Čím bude tato indukčnost větší, tím bude menší výkon budoucího transformátoru.

Takto hrubě vytvořený spínací impuls se dále doladí postupným připojováním prvků T článku, které byly na začátku kapitoly zanedbány. Tyto prvky už na impuls nebudou mít tak velký vliv jako  $R_1$  a  $L_\mu$ . Výborným pomocníkem pro tento krok návrhu je opět preprocesor programu EMTP-ATP ATPDraw a jeho procedura SATURABLE TRANSFORMER. V této proceduře se zadávají hodnoty prvků T článku (tzn. odpor a indukčnost primárního a sekundárního vinutí, primární a sekundární napětí, odpor magnetického obvodu) a saturace v primárním vinutí (indukčnost magnetického obvodu). Saturace se zadává buď jako závislost  $I = f(U)$ , nebo

$I = f(\Phi \cdot B)$ . Zde se zadá přímkovou závislostí  $I = f(U)$ , kde  $I$  se libovolně zvolí a napětí dopočítá podle vztahu (2.13). Jak už bylo řečeno, indukčnost primárního vinutí  $L_{1\sigma}$  má jakýsi malý vliv na dobu čela, odpor magnetického obvodu transformátoru  $R_{Fe}$  zase na amplitudu (snižováním odporu  $R_{Fe}$  od určité hodnoty se snižuje amplituda impulsu).

$$U = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{\mu} \cdot I \quad (2.13)$$

Není výhodné, aby se kondenzátor  $C_1$  nabíjel příliš vysokým napětím. Proto se nabíjecí napětí  $U_C$  patřičně sníží a převod transformátoru potom zajistí žádané napětí na sekundární straně. Snížením nabíjecího napětí se musí upravit i ostatní parametry:

Aby byl zachován požadavek na energii generátoru  $E$ , kondenzátor  $C_1$  tedy musí mít jinou kapacitu, a to podle vztahu  $C_1 = \frac{2 \cdot E}{U_C^2}$ . (2.14)

Odpory a indukčnosti se přepočítají pomocí převodu transformátoru  $p = \frac{U_1}{U_2}$ : (2.15)

$$R_1 = R_2 \cdot p^2 \quad (2.16)$$

$$L_1 = L_2 \cdot p^2 \quad (2.17)$$

Z prvků T článku se nakonec vypočítají štitkové hodnoty transformátoru, které se budou zadávat do procedury preprocesoru ATPDraw BCTRAN.

$$\text{Výkon transformátoru } S = \frac{U_1^2}{X_{\mu}}. \quad (2.18)$$

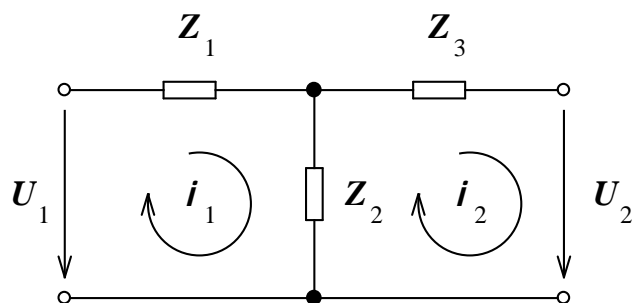
$$\text{Primární proud } I_1 = \frac{P}{U_1}. \quad (2.19)$$

$$\text{Impedance transformátoru } Z = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_1}{I_1}. \quad (2.20)$$

$$\text{Odpor primárního vinutí transformátoru } R_{1T} = \frac{\sqrt{Z^2 - (X_{1\sigma} + X_{2\sigma})^2}}{2}. \quad (2.21)$$

Odpor  $R_{1T}$  bude pravděpodobně daleko menší než odpor  $R_1$  z návrhu T článku. Proto se předřadí před transformátor externí rezistor  $R_{\text{Ext}} = (R_1 + R'_{2T}) - (R_{1T} + R'_{2T})$ . (2.22)

Pomocí metody smyčkových proudů se vyřeší T článek na Obr. 2.4. Řešením soustavy rovnic (2.23) a (2.24) se vypočítají proudy  $i_1$ ,  $i_2$  a z nich proud příčnou větví  $i_0$ .



Obr. 2.4 T článek

$$\begin{aligned} \bar{i}_1: \bar{Z}_1 \cdot \bar{i}_1 + \bar{Z}_2 \cdot \bar{i}_1 - \bar{Z}_2 \cdot \bar{i}_2 &= \bar{U}_1 \\ \bar{i}_2: \bar{Z}_2 \cdot \bar{i}_2 - \bar{Z}_2 \cdot \bar{i}_1 + \bar{Z}_3 \cdot \bar{i}_2 &= -\bar{U}_2 \end{aligned} \quad (2.23), (2.24)$$

$$\text{Proud naprázdno } i_0 = \frac{\sqrt{\bar{i}_1^2 - (\bar{i}_2 \cdot p)^2}}{I_1} \cdot 100. \quad (2.25)$$

$$\text{Ztráty naprázdno } \Delta P_0 = \frac{U_1^2}{R_{\text{Fe}}}. \quad (2.26)$$

$$\text{Ztráty nakrátko } \Delta P_k = (R_{1T} + R'_{2T}) \cdot I_1^2. \quad (2.27)$$

Kapacita zkoušeného předmětu  $C_{Zk}$  není vypočtena analyticky, ale pro jednoduchost je pouze pokusem navržena v programu EMTP-ATP tak, aby parametry impulsu nepřekročily normované tolerance viz. 1.1.

### 3 Ověření metodiky návrhu

Ověření metodiky návrhu generátoru spínacího impulsu napětí SGSA 600-30 a generátoru s transformátorem je proveden pomocí PC programu EMTP-ATP, který slouží k simulaci přechodných dějů v elektrických obvodech.

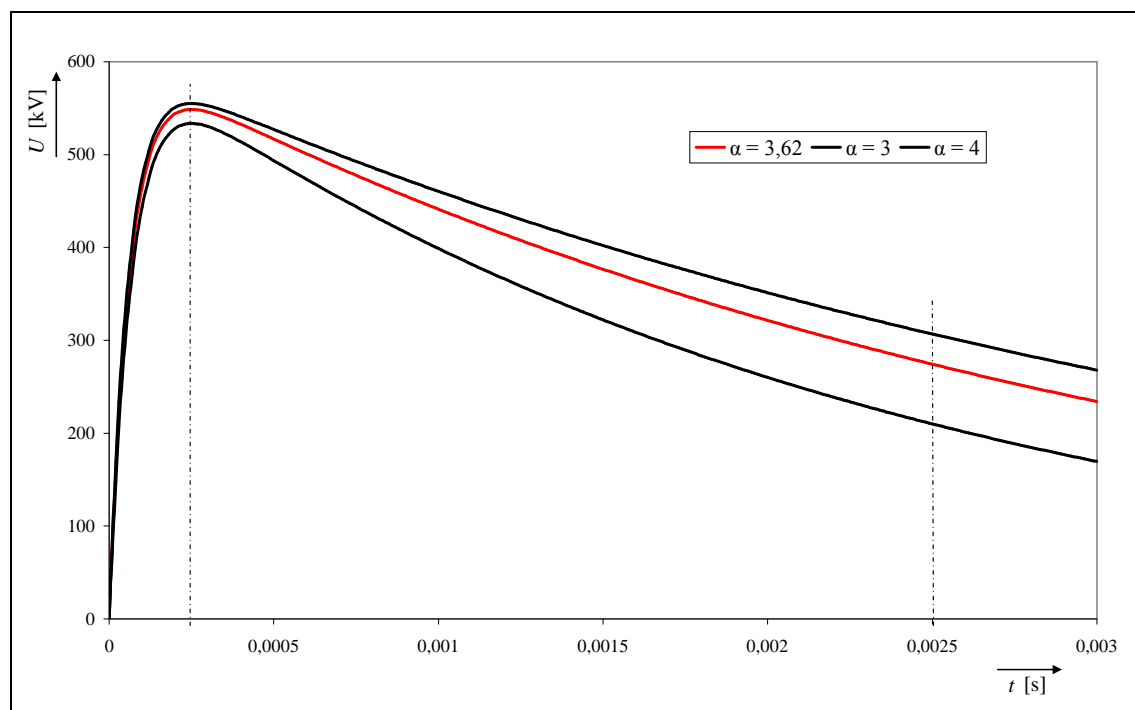
#### 3.1 Řešení návrhu generátoru SGSA 600-30

Z katalogu firmy Haefely [4] jsou vyčteny hodnoty kapacit  $C_1$  a  $C_2$ , velikost nabíjecího napětí  $U_C$ . Normalizované doby čela a půltýlu pro spínací impuls jsou uvedeny v kapitole 1.1.

**Tab. 3.1** Vstupní hodnoty generátoru SGSA 600-30

$U_C$ (kV)	600
$C_1$ (nF)	167
$C_2$ (nF)	1,7
$T_\delta$ ( $\mu$ s)	250
$T_p$ ( $\mu$ s)	2500

Podle postupu z kapitoly 2.1 je konstanta generátoru  $\alpha$  přesně 3,62... Na Obr. 3.1 je graficky znázorněno vyhodnocení tohoto koeficientu.



**Obr. 3.1** Vyhodnocení konstanty  $\alpha$

Dosazením do rovnice (2.2) za  $\alpha = 3,62$  a  $T_{\varepsilon} = 250 \mu\text{s}$  je dána konstanta  $\Theta$ .

$$\Theta = T_{\varepsilon} \cdot \frac{2 \cdot \sqrt{\alpha^2 - 1}}{\ln \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 - 1}}{\alpha - \sqrt{\alpha^2 - 1}}} = 250 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{2 \cdot \sqrt{3,62^2 - 1}}{\ln \frac{3,62 + \sqrt{3,62^2 - 1}}{3,62 - \sqrt{3,62^2 - 1}}} = 444 \mu\text{s}$$

Pomocný činitel  $X$  se vypočítá dosazením příslušných kapacit z Tab. 3.1 a konstanty  $\alpha$  do vztahu (2.3).

$$X = \frac{1}{\alpha^2} \cdot \left( 1 + \frac{C_2}{C_1} \right) = \frac{1}{3,62^2} \cdot \left( 1 + \frac{1,7}{167} \right) = 0,077$$

Pomocí tohoto činitele se určí odpory  $R_1$  a  $R_2$  pomocí rovnic (2.4), (2.5).

$$R_1 = \frac{\alpha \cdot \Theta}{C_2} \cdot (1 - \sqrt{1 - X}) = \frac{3,62 \cdot 444 \cdot 10^{-6}}{1,7 \cdot 10^{-9}} \cdot (1 - \sqrt{1 - 0,077}) = 37,1 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = \frac{\alpha \cdot \Theta}{C_1 + C_2} \cdot (1 + \sqrt{1 - X}) = \frac{3,62 \cdot 444 \cdot 10^{-6}}{167 \cdot 10^{-9} + 1,7 \cdot 10^{-9}} \cdot (1 + \sqrt{1 - 0,077}) = 18,7 \text{ k}\Omega$$

Z prvků generátoru je pak určena z (2.6) poslední konstanta generátoru  $\eta$ .

$$\eta = 1 + \frac{C_2}{C_1} \cdot \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) = 1 + \frac{1,7}{167} \cdot \left( 1 + \frac{37,1}{18,7} \right) = 1,03$$

Amplituda impulzu generátoru plyne z Angeliniho rovnice (2.7).

$$\begin{aligned} U_m &= \frac{U_c}{\eta \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{\alpha^2}}} \cdot \left[ e^{-\left( \alpha - \sqrt{\alpha^2 - 1} \right) \frac{T_{\varepsilon}}{\Theta}} - e^{-\left( \alpha + \sqrt{\alpha^2 - 1} \right) \frac{T_{\varepsilon}}{\Theta}} \right] = \\ &= \frac{600 \cdot 10^3}{1,03 \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{3,62^2}}} \cdot \left[ e^{-\left( 3,62 - \sqrt{3,62^2 - 1} \right) \frac{250}{444}} - e^{-\left( 3,62 + \sqrt{3,62^2 - 1} \right) \frac{250}{444}} \right] = 548,6 \text{ kV} \end{aligned}$$

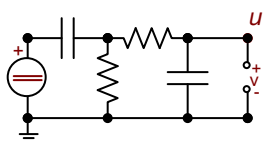
Využití generátoru je potom:

$$\frac{U_m}{U_c} = \frac{548,6}{600} = 0,914.$$

**Tab. 3.2 Vypočtené parametry a konstanty generátoru SGSA 600-30**

$\Theta$ ( $\mu\text{s}$ )	$\eta$ (-)	$\alpha$ (-)	$X$ (-)	$R_1$ ( $\text{k}\Omega$ )	$R_2$ ( $\text{k}\Omega$ )	$U_m$ (kV)
444	1,03	3,62	0,077	37,1	18,7	548,6

V prostředí grafického preprocesoru se namodeluje obvod z Obr. 1.4. Za jednotlivé prvky obvodu se dosadí příslušné hodnoty z Tab. 3.1 a Tab. 3.2 a spustí výpočet. Napěťový impuls je pak vykreslen nějakým grafickým zobrazovačem (zde Plotxy) viz. Obr. 3.3.

**Obr. 3.2 Model generátoru SGSA 600-30 v ATPDraw**

### Určení maximální kapacity zkoušeného předmětu $C_{zk}$

Jakmile se připojí ke generátoru zkoušený předmět, impuls začne měnit své normalizované parametry. V programu EMTP-ATP jsou připojovány kondenzátory o různých kapacitách tak, aby se impuls vešel do normovaných tolerancí. Mění se především amplituda a doba čela. Nejlepší výsledek se dostavil s kapacitou 450 pF. Na Obr. 3.3 je srovnání impulsu bez zkoušeného předmětu a impulsu se zkoušeným předmětem. Číselně vyjádřené tolerance jsou následující:

$$\text{Tolerance amplitudy } U_m \pm 3 \% U_m = 548,6 \pm \frac{3}{100} \cdot 548,6 = 565 (532) \text{ kV} .$$

$$\text{Tolerance doby čela } T_c \pm 20 \% T_c = 250 \pm \frac{20}{100} \cdot 250 = 200 (300) \mu\text{s} .$$

$$\text{Tolerance doby půltýlu } T_p \pm 60 \% T_p = 2500 \pm \frac{60}{100} \cdot 2500 = 1000 (4000) \mu\text{s} .$$

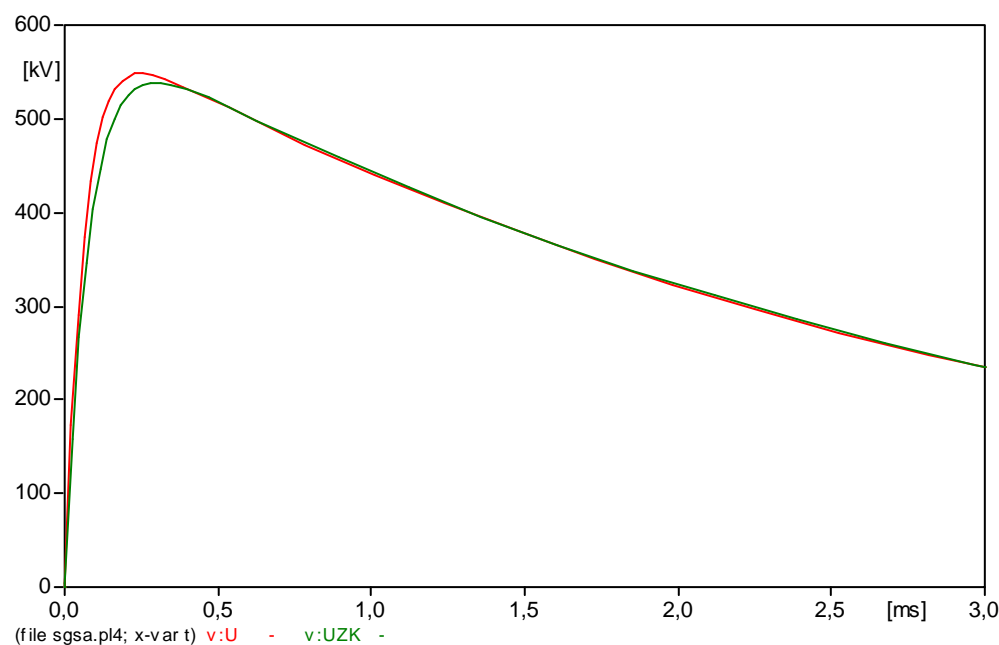
**Tab. 3.3 Odečtené parametry impulsu**

$U_m$ (kV)	548,6
$U_m/U_C$ (-)	0,914
$T_c$ ( $\mu\text{s}$ )	250
$T_p$ ( $\mu\text{s}$ )	2500

**Tab. 3.4 Parametry impulsu se zkoušeným předmětem**

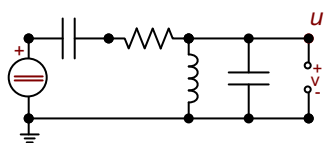
$U_m$ (kV)	538,9
$U_m/U_C$ (-)	0,898
$T_c$ ( $\mu\text{s}$ )	300
$T_p$ ( $\mu\text{s}$ )	2570



Obr. 3.3 Srovnání impulzů generátoru s a bez  $C_{Zk}$ 

### 3.2 Řešení návrhu generátoru s transformátorem

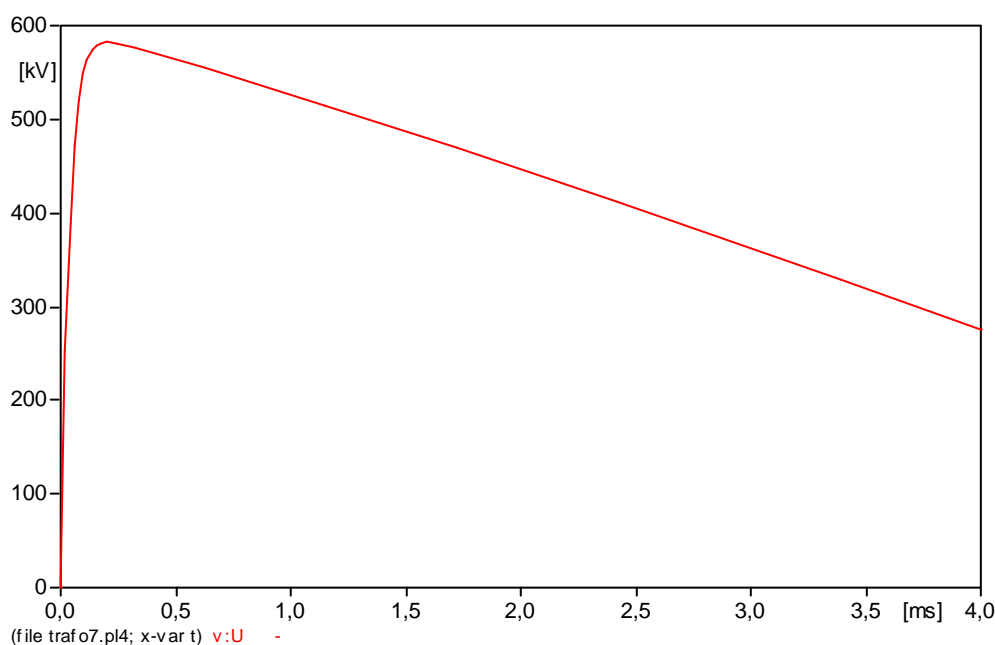
V grafickém preprocesoru se namodeluje obvod dle Obr. 2.2. Kapacity  $C_1$ ,  $C_2$  a nabíjecí napětí  $U_C$  je zde stejné jako v předchozí kapitole (Tab. 3.1). Pouze změnami odporu  $R_1$  a indukčnosti  $L_\mu$  je dosaženo potřebného tvaru spínacího impulsu. Impulz, který se nejvíce podobá normalizovanému spínacímu impulsu, s ohledem na patřičné změny uvedené v kapitole 2.2, je dán prvky uvedenými v Tab. 3.5.

Obr. 3.4 Model  $RLC-C$  obvodu v ATPDrawTab. 3.5 Vstupní hodnoty pro  $RLC-C$  obvod

$U_C$ (kV)	600
$C_1$ (nF)	167
$C_2$ (nF)	1,7
$R_1$ (k $\Omega$ )	22
$L_\mu$ (H)	191

**Tab. 3.6 Odečtené parametry impulsu**

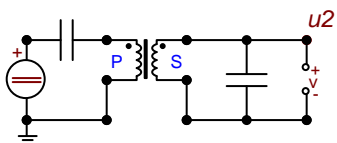
$U_m$ (kV)	582,5
$U_m/U_C$ (-)	0,971
$T_\varepsilon$ ( $\mu$ s)	202
$T_p$ ( $\mu$ s)	3829

**Obr. 3.5 Napěťový impuls vyrobený RLC-C obvodem**

### Obvod se SATURABLE TRANSFORMER

Místo odporu  $R_1$  a indukčnosti  $L_\mu$  v obvodě na Obr. 3.4 se připojí transformátor. V ATPDraw se jedná o už zmiňovanou proceduru SATURABLE TRANSFORMER. Zadájí se zde primární a sekundární napětí, odpor primárního vinutí  $R_1$  a sekundárního vinutí  $R_2 = R_1$  (převod transformátoru je 1). Hodnoty odporu magnetického obvodu  $R_{Fe}$  a indukčnosti primárního  $L_{1\sigma}$  (sekundárního  $L_{2\sigma}$ ) vinutí se postupně zvětšují či zmenšují (do viditelné změny impulsu). Indukčnost  $L_\mu$  je schována v záložce pod názvem saturace v primárním vinutí  $I = f(U)$ . Jestliže proud  $I$  bude 1 A, pak napětí  $U$  bude podle vzorce (2.13):

$$U = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_\mu \cdot I = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 191 = 60 \text{ kV}$$



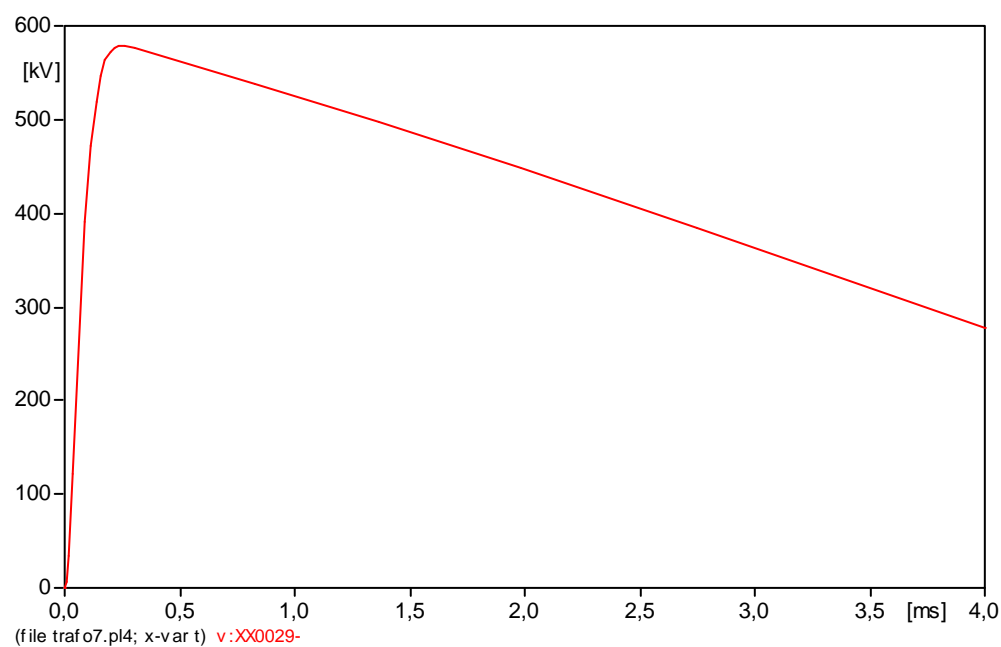
Obr. 3.6 Model generátoru se SATURABLE TRANSFORMER

Tab. 3.7 Vstupní hodnoty pro T článek

$U_1$ (kV)	$R_1$ (k $\Omega$ )	$L_1$ (H)	$U_2$ (kV)	$R_2$ (k $\Omega$ )	$L_2$ (H)	$R_{Fe}$ (M $\Omega$ )
600	22	0,5	600	22	0,5	5

Tab. 3.8 Odečtené parametry impulzu

$U_m$ (kV)	579,9
$U_m/U_C$ (-)	0,967
$T_\xi$ ( $\mu$ s)	250
$T_p$ ( $\mu$ s)	3861



Obr. 3.7 Napěťový impulz generátoru se SATURABLE TRANSFORMER

**Obvod se SATURABLE TRANSFORMER ( $U_1 = 6 \text{ kV}$ )**

Primární napětí je sníženo z 600 kV na např. 6 kV, je zapotřebí přepočítat některé prvky v obvodu. Impulz by měl zůstat identický s impulzem na Obr. 3.7. Aby byl zachován požadavek na energii generátoru  $E$ , kondenzátor  $C_1$  tedy bude mít kapacitu podle rovnice (2.14).

$$C_1 = \frac{2 \cdot E}{U_1^2} = \frac{2 \cdot 30 \cdot 10^3}{(6 \cdot 10^3)^2} = 1,67 \text{ mF}$$

Prvky v primárním a příčném obvodu transformátoru se také musejí přepočítat, a to podle vzorců (2.16), (2.17). Převod transformátoru je dán poměrem primárního a sekundárního napětí viz. (2.15).

$$R'_1 = R_2 \cdot p^2 = 22000 \cdot \left(\frac{6}{600}\right)^2 = 2,2 \Omega$$

$$L'_1 = L_2 \cdot p^2 = 0,5 \cdot \left(\frac{6}{600}\right)^2 = 0,05 \text{ mH}$$

$$L'_\mu = L_\mu \cdot p^2 = 191 \cdot \left(\frac{6}{600}\right)^2 = 19,1 \text{ mH}$$

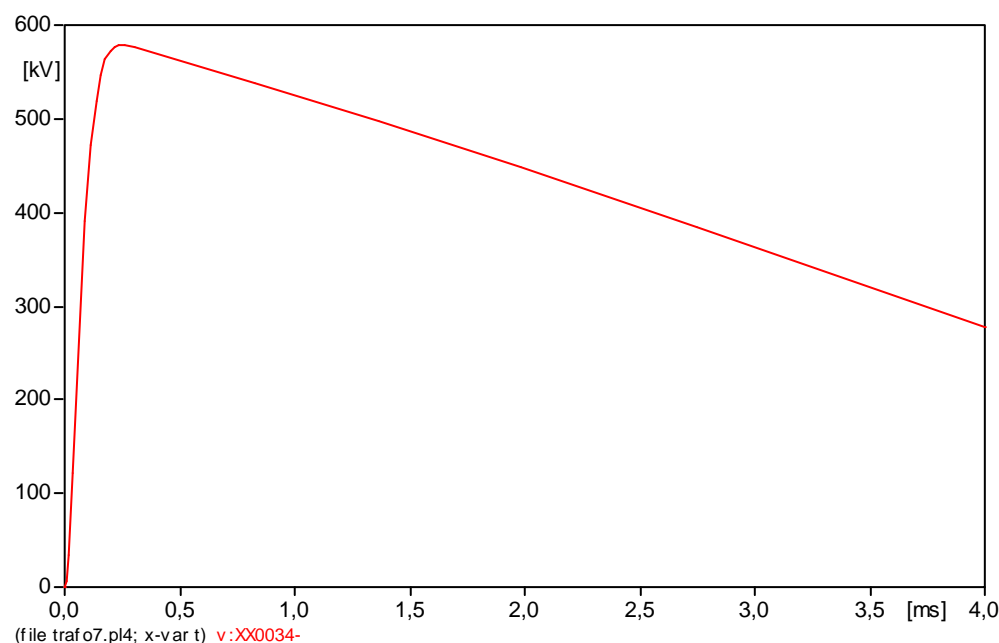
$$R'_{Fe} = R_{Fe} \cdot p^2 = 5 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{6}{600}\right)^2 = 500 \Omega$$

**Tab. 3.9 Parametry T článku**

$U_1$ (kV)	$R'_1$ ( $\Omega$ )	$L'_1$ (mH)	$U_2$ (kV)	$R_2$ (k $\Omega$ )	$L_2$ (H)	$R'_{Fe}$ ( $\Omega$ )
6	2,2	0,05	600	22	0,5	500

**Tab. 3.10 Odečtené parametry impulsu**

$U_m$ (kV)	579,9
$U_m/U_C$ (-)	0,967
$T_\xi$ ( $\mu$ s)	250
$T_p$ ( $\mu$ s)	3861



**Obr. 3.8** Napěťový impuls generátoru se SATURABLE TRANSFORMER ( $U_1 = 6 \text{ kV}$ )

### Obvod s BCTRAN

V ATPDraw se SATURABLE TRANSFORMER nahradí procedurou BCTRAN. Je to procedura transformátoru, do které se zadávají šítkové hodnoty stroje. Šítkové hodnoty se určí pomocí vzorců (2.18) až (2.27) z kapitoly 2.2.

$$\text{Výkon transformátoru } S = \frac{U_1^2}{X'_\mu} = \frac{(6 \cdot 10^3)^2}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,0191} = 6 \text{ MV} \cdot \text{A}.$$

$$\text{Primární proud } I_1 = \frac{P}{U_1} = \frac{6 \cdot 10^6}{6 \cdot 10^3} = 1000 \text{ A}.$$

Napětí nakrátko bývá u transformátorů v rozmezí 4 až 12 %. Zvolí se např. 6 %. Impedance

$$\text{transformátoru tedy bude } Z = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_1}{I_1} = \frac{6}{100} \cdot \frac{6 \cdot 10^3}{1000} = 0,36 \Omega.$$

Odpor primárního vinutí transformátoru

$$R_{IT} = \frac{\sqrt{Z^2 - (X'_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2}}{2} = \frac{\sqrt{0,36^2 - (2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot (5 \cdot 10^{-5} + 5 \cdot 10^{-5}))^2}}{2} = 0,179 \Omega.$$

Odpor  $R_{1T}$  je daleko menší než odpor  $R_1$  z Tab. 3.9. Proto je před transformátor předřazen externí rezistor  $R_{Ext} = (R'_1 + R'_2) - (R_{1T} + R_{2T}) = (2,2 + 2,2) - (0,179 + 0,179) = 4,04 \Omega$ .

Řešením soustavy rovnic (2.6) a (2.7) pro Obr. 2.4 se určí proudy  $i_1$ ,  $i_2$ , z nich je potom vypočítán proud příčnou větví  $i_0$  podle (2.25).

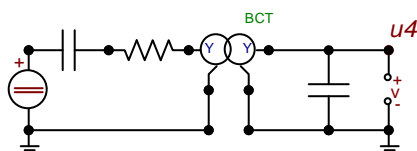
$$\bar{i}_1 = 622,7 A$$

$$\bar{i}_2 = 11,5 A$$

$$i_0 = \frac{\sqrt{\bar{i}_1^2 - (\bar{i}_2 \cdot p)^2}}{I_1} \cdot 100 = \frac{\sqrt{622,7^2 - \left[11,5 \cdot \left(\frac{6}{600}\right)\right]^2}}{1000} \cdot 100 = 62,28 \%$$

$$\text{Ztráty naprázdno } \Delta P_0 = \frac{U_1^2}{R'_{Fe}} = \frac{(6 \cdot 10^3)^2}{500} = 72 \text{ kW}.$$

$$\text{Ztráty nakrátko } \Delta P_k = (R_{1T} + R_{2T}) \cdot I_1^2 = (0,179 + 0,179) \cdot 1000^2 = 358,6 \text{ kW}.$$



**Obr. 3.9 Model generátoru s BCTRAN**

**Tab. 3.11 Vstupní hodnoty pro generátor s BCTRAN**

$U_C$ (kV)	6
$C1$ (μF)	1670
$R_{Ext}$ (Ω)	4,04
$U_1$ (kV)	6
$U_2$ (kV)	600
$S$ (MV·A)	6
$u_k$ (%)	6
$i_0$ (%)	62,28
$\Delta P_0$ (kW)	72
$\Delta P_k$ (kW)	358,6

### Určení maximální kapacity zkoušeného předmětu $C_{zk}$

Jakmile se připojí ke generátoru zkoušený předmět, impulz začne měnit své normalizované parametry. V programu EMTP-ATP jsou připojovány kondenzátory o různých kapacitách tak, aby se impulz vešel do normovaných tolerancí. Mění se především amplituda a doba čela. Nejlepší výsledek se dostavil s kapacitou 300 pF. Na Obr. 3.10 je srovnání impulzu bez zkoušeného předmětu a impulzu se zkoušeným předmětem. Číselně vyjádřené tolerance jsou následující:

$$\text{Tolerance amplitudy } U_m \pm 3 \% U_m = 583,2 \pm \frac{3}{100} \cdot 548,6 = 600,7 (565,7) \text{ kV} .$$

$$\text{Tolerance doby čela } T_c \pm 20 \% T_c = 250 \pm \frac{20}{100} \cdot 250 = 200 (300) \mu\text{s} .$$

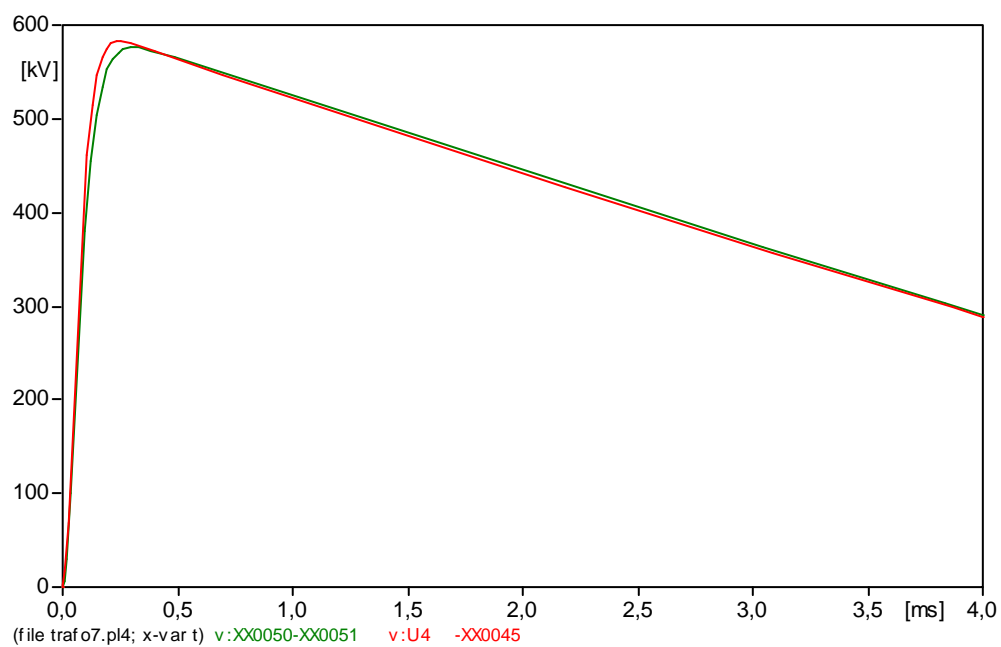
$$\text{Tolerance doby půltýlu } T_p \pm 60 \% T_p = 2500 \pm \frac{60}{100} \cdot 2500 = 1000 (4000) \mu\text{s} .$$

**Tab. 3.12 Odečtené parametry impulzu**

$U_m$ (kV)	583,2
$U_m/U_C$ (-)	0,972
$T_c$ ( $\mu\text{s}$ )	246
$T_p$ ( $\mu\text{s}$ )	3967

**Tab. 3.13 Parametry impulzu se zkoušeným předmětem**

$U_m$ (kV)	576,2
$U_m/U_C$ (-)	0,96
$T_c$ ( $\mu\text{s}$ )	300
$T_p$ ( $\mu\text{s}$ )	4000



**Obr. 3.10** Srovnání impulzů generátoru s a bez  $C_{zk}$



## Závěr

Úkolem této bakalářské práce bylo mimo jiné vytvořit metodiku pro návrh generátoru spínacího impulsu a tuto metodiku ověřit.

Generátor SGSA 600-30 (respektive napěťový impuls generátoru) byl porovnán s katalogem firmy Haefely, odkud byly vyčteny potřebné vstupní údaje pro návrh. Všechny parametry popisující tvar impulsu jsou v příslušných tolerancích (viz. Tab. 3.3). Katalogová hodnota amplitudy impulsu se však liší od vypočtené hodnoty. To je pravděpodobně způsobeno nedostatkem informací o vnitřním zapojení generátoru, které katalog neuvádí. Kapacita zkoušeného předmětu připojená ke generátoru může být maximálně 450 pF (omezení tolerancemi normalizovaného impulsu napětí), což odpovídá předmětům jako jsou např. izolátory a průchodky, jejichž kapacita se pohybuje v rozmezí  $100 \div 300$  pF.

Parametry impulsu generátoru s transformátorem byly nepatrně modifikovány. Kvůli možnosti snížení výkonu transformátoru byla prodloužena doba půltýlu na 60 % (maximální tolerance). Na první pohled se může zdát, že výkon transformátoru je příliš velký. Bude-li se brát v úvahu doba trvání impulsu, může se tento výkon snížit, transformátor však bude mžikově přetížen. Dále je třeba před transformátor předřadit externí odpor, aby se nezměnil celkový čelní odpor generátoru. Kapacita zkoušeného předmětu připojená ke generátoru s transformátorem může být maximálně 300 pF (izolátory, průchodky). Nezbyvá už tedy nic jiného než pomocí štičkových hodnot z Tab. 3.11 tento transformátor navrhnout a vyrobit. Generátor pak může sloužit pro školní účely např. jako další laboratorní úloha ve cvičení z TVN na VŠB-TUO.

## Seznam obrázků

Obr. 1.1	Vyhodnocení normalizovaného spínacího impulsu napětí .....	3
Obr. 1.2	Schéma zapojení generátoru spínacího impulsu napětí .....	3
Obr. 1.3	Schéma jednostupňového generátoru spínacího impulsu napětí .....	4
Obr. 1.4	Schéma jednostupňového generátoru spínacího impulsu napětí .....	4
Obr. 1.5	Schéma zapojení generátoru spínacího impulsu napětí v Marxově zapojení .....	5
Obr. 1.6	Zjednodušené schéma Marxova zapojení .....	5
Obr. 1.7	Schéma zapojení generátoru spínacího impulsu napětí s transformátorem .....	6
Obr. 2.1	Náhradní schéma generátoru s transformátorem .....	10
Obr. 2.2	$RLC(-C)$ obvod .....	11
Obr. 2.3	Průběh napětí na indukčnosti v $RLC$ obvodu.....	12
Obr. 2.4	T článek.....	14
Obr. 3.1	Vyhodnocení konstanty $\alpha$ .....	15
Obr. 3.2	Model generátoru SGSA 600-30 v ATPDraw .....	17
Obr. 3.3	Srovnání impulsů generátoru s a bez $C_{Zk}$ .....	18
Obr. 3.4	Model $RLC-C$ obvodu v ATPDraw .....	18
Obr. 3.5	Napětový impuls vyrobený $RLC-C$ obvodem .....	19
Obr. 3.6	Model generátoru se SATURABLE TRANSFORMER.....	20
Obr. 3.7	Napětový impuls generátoru se SATURABLE TRANSFORMER .....	20
Obr. 3.8	Napětový impuls generátoru se SATURABLE TRANSFORMER ( $U_1 = 6$ kV) .....	22
Obr. 3.9	Model generátoru s BCTRAN .....	23
Obr. 3.10	Srovnání impulsů generátoru s a bez $C_{Zk}$ .....	25

## **Literatura**

- [1] Akademik Veverka, A.: Technika vysokých napětí, SNTL/ALFA Praha, 1982
- [2] Dr. Ing. Mach, V.: Skriptum Technika vysokého napětí, ES VŠB-TU Ostrava, 2001
- [3] Dr. Ing. Mach, V.: Cvičení z TVN. Ostrava, ES VŠB, 1991
- [4] Haefely. WWW: <<http://www.haefely.com/10-products/10-impulse-voltage-testing.php>>